

В докладе приводятся результаты расчета дисперсии для нескольких азимутально-симметричных и азимутально-несимметричных волн при отсутствии и наличии магнитных потерь в феррите. Рассматривается влияние параметров резистивной пленки на дисперсионные свойства волн. Исследуется изменение поляризации линейно поляризованной волны при ее распространении в КФВ с анизотропно проводящей резистивной пленкой на поверхности.

### Литература

1. Сул Г., Уокер Л. Вопросы волноводного распространения электромагнитных волн в гиротропных средах. М.: Иностранная литература, 1955. 189 с.
2. Веселов Г.И., Раевский С.Б. Слоистые металлодиэлектрические волноводы. М.: Радио и связь, 1988. 248 с.

## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОАКСИАЛЬНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ СВЧ УСТРОЙСТВ

*В.А. Козлов, А.Л. Кунилов, Ю.А. Светлаков, А.Ю. Седаков*

(Нижний Новгород, ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова» [niiis@niiis.nnov.ru](mailto:niiis@niiis.nnov.ru))

## MANUFACTURING TECHNIQUE COAXIAL CERAMIC RESONATORS FOR MICROWAVE DEVICES

*V.A. Kozlov, A.L. Kunilov, Yu.A. Svetlakov, A.Yu. Sedakov*

В современной технике СВЧ широкое применение находит микроволновая диэлектрическая керамика, используемая в качестве основы резонансных элементов фильтров и полупроводниковых генераторов, а также диэлектриков в СВЧ конденсаторах. Одно из применений микроволновой керамики – использование в качестве материала коаксиальных керамических резонаторов (ККР).

В России основным разработчиком и изготовителем керамических материалов для ККР является ООО «Керамика» (г. Санкт-Петербург) [1, 2]. Там же организован серийный выпуск резонаторов. Однако выпускаемый ООО «Керамика» ассортимент ККР [1] не покрывает полностью потребностей разработчиков СВЧ узлов и приборов, особенно при проведении НИР и ОКР. В ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова» для изготовления ККР, отвечающих техническим требованиям разработчиков СВЧ устройств, разработаны специальные технологии изготовления ККР с использованием имеющихся в распоряжении разработчиков типовых технологических средств, позволяющие обеспечивать необходимой номенклатурой резонаторов ограниченного количества деталей одного типоразмера. В соответствии с применяемой на предприятии структурой технологического обеспечения при системном проектировании СВЧ устройств [3], было определено, что при проведении НИОКР для сокращения сроков изготовления макетов рационально изготавливать резонаторы методами «экспресс-технологии», суть которой заключается в механической обработке заготовок в виде керамических брусков (из сортамента, предлагаемого на рынке продукции или заготовок, полученных прессованием с применением имеющихся в производстве пресс-форм). Такой подход позволяет исключить проектирование и изготовление достаточно дорогостоящих специальных пресс-форм для прессования заготовок и значительно сокращает затраты и сроки на проектирование СВЧ узлов, в состав которых входят резонаторы.

Предложенная технология внедрена в ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова» в условиях опытного производства.

Конструктивно ККР представляет собой прямоугольный параллелепипед со сквозным отверстием по продольной оси. Все поверхности резонатора, кроме одного торца, покрыты серебром. Типовые размеры поперечного сечения резонаторов –  $6 \times 6 \text{ мм}^2$  и  $3 \times 3,5 \text{ мм}^2$ . Высота (длина) соответствует четверти длины волны в резонаторе. Диаметр отверстия – 1 мм и более.

В общем виде предложенная технология изготовления ККР заключается в следующем: по технологии полусухого прессования заготовки прессуются в пресс-формах с последующей механической обработкой парафинированных заготовок (в случае применения заготовок виде брусков из сортамента данная процедура не выполняется); после обжига заготовки шлифуются в технологический размер по внешним поверхностям и производится формообразование отверстий ультразвуковым методом размерной обработки. Покрытие заготовок резонаторов серебром выполняется путём вжигания пасты СрП-П-04, нанесённой на поверхность заготовок [4]. Механическая обработка (доработка) заготовок производится на собственной производственно-технологической базе, созданной для выполнения высокоточной размерной обработки деталей из твёрдых хрупких неметаллических материалов [5].

Изготовленные на предприятии по данной технологии образцы ККР из керамических материалов В80, В100, В110, В124 (созданных в ООО «Керамика» на основе барийлантаноидных тетратитанатов) были использованы при разработке узкополосных полосно-пропускающих фильтров и мощных стабильных полупроводниковых автогенераторов [4].

Наиболее ответственной и трудоемкой технологической операцией при механической обработке заготовок ККР является получение отверстий. Одним из методов получения отверстий в керамических деталях является сверление алмазными свёрлами [6]. Применение данного метода возможно при отношении глубины обработки к диаметру отверстия не более 5. При большем соотношении происходит разрушение инструмента, что связано, вероятно, с брикетированием керна в полости сверла и затруднением прохождения смазочно-охлаждающей жидкости в зону резания [6].

В данном случае для размерной обработки отверстий применяется ультразвуковая размерная обработка, заключающаяся в направленном разрушении обрабатываемого материала под действием ударов абразивных зёрен, находящихся между поверхностями материала и инструмента, колеблющегося с ультразвуковой частотой в продольном направлении [7]. Точность УЗ обработки отверстий зависит от их глубины.

Разработанный в соответствии с «экспресс-технологией» типовой технологический процесс изготовления ККР, используемых на этапах НИР и ОКР с целью выбора подходящих материалов и определения оптимальных размеров, обеспечивает обработку резонаторов с точностью по 9 качеству (до 0,048 мм) и шероховатостью поверхностей Ra 0,63, отверстий – по 12 качеству (до 0,1 мм) и Ra 2,5 соответственно. По данному технологическому процессу возможно обработка отверстий диаметром от 1 мм с соотношением высоты резонатора к диаметру отверстия до 10 (ультразвуковая обработка отверстия ведётся со стороны одного торца заготовки). Проведённые экспериментальные работы показали возможность изготовления резонаторов с отношением высоты к диаметру отверстия до 15. В этом случае ультразвуковая обработка отверстия должна производиться последовательно со стороны двух торцевых поверхностей заготовки с последующей калибровкой отверстия.

Разработанная технология позволяет создавать в производственных условиях предприятий-разработчиков и производителей радиоэлектронной аппаратуры требуемую для проектирования СВЧ устройств номенклатуру коаксиальных керамических резонаторов.

### **Литература**

1. ВЧ- и СВЧ-керамические материалы и микроволновые элементы. Каталог продукции. г. Санкт-Петербург. ООО «Керамика». 2004.
2. Ненашева Е.А. Состояние дел в области разработок и производства микроволновых керамических материалов и элементов СВЧ-техники // Труды Междунар. научн.-практ. конфер. «Функциональная керамика 2006». 10-12 окт. 2006 г. г. Нижний Новгород. 2006. С. 78-82.
3. Козлов В.А., Светлаков Ю.А., Седаков А.Ю. Структура технологического обеспечения при системном проектировании и изготовлении СВЧ устройств: Материалы XVII Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии», ИСТ-2011. – Нижний Новгород, НГТУ, 2011, С. 92-93.

4. Козлов В.А., Кунилов А.Л., Светлаков Ю.А., Седаков А.Ю., Ухватова Л.С., Шишкин Д.Р. Применение керамических резонаторов в устройствах СВЧ диапазона // В кн. Антенны и функциональные узлы СВЧ- и КВЧ-диапазонов. – М.: Радиотехника. – 2011. – С. 98-103.
5. Светлаков Ю.А. Разработка технологий механической обработки деталей из твёрдых хрупких неметаллических материалов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2008. №1 (90). С.46-51.
6. Балыков А.В., Цесарский А.А. Алмазное сверление деталей из труднообрабатываемых неметаллических материалов. М.: Машиностроение. 1980.
7. Волосатов В.А. Ультразвуковая обработка. Л.: Лениздат. 1978. 1973. 248 с.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИХ СВЧ-ФИЛЬТРОВ НА ОСНОВЕ КОАКСИАЛЬНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ

*В.А. Козлов, А.Л. Кунилов, Ю.А. Светлаков, Д.Р. Шишкин, М.М. Ивойлова*  
(Нижний Новгород, ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е.Седакова» [niiis@niiis.nnov.ru](mailto:niiis@niiis.nnov.ru))

## DESIGNING OF BAND-PASS MICROWAVE FILTERS ON THE BASIS OF COAXIAL CERAMIC RESONATORS

*V.A. Kozlov, A.L. Kunilov, Yu.A. Svetlakov, D.R. Shishkin, M.M Ivoilova*

Проектирование СВЧ - приёмных устройств РЛС, GPS, ГЛОНАСС и т.п. требует создания малогабаритных полосно-пропускающих фильтров (ППФ) дециметрового диапазона с высокими избирательными характеристиками и температурной стабильностью [1-3]. На этапах НИОКР по созданию данных СВЧ - устройств эффективным способом их проектирования является применение в качестве колебательных контуров коаксиальных керамических резонаторов (ККР), изготовленных из высокостабильной керамики.

В настоящей работе, в качестве примера практического использования данного подхода к разработке избирательных СВЧ - устройств, приведены результаты проектирования ППФ на основе ККР, предназначенного для усилителя промежуточной частоты широкодиапазонного СВЧ - приёмника с электронной перестройкой частоты. ККР изготавливались по специально разработанной «экспресс - технологии» (методами механической обработки из заготовок в виде брусков из необходимого керамического материала) [4], что позволило сократить сроки и затраты на разработку ППФ.

Принципиальная схема ППФ приведена на рис. 1.

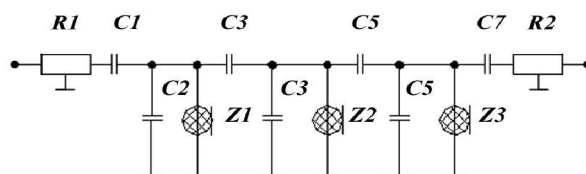


Рис. 1. Принципиальная схема ППФ

В ППФ используются три резонатора  $Z1$ ,  $Z2$ ,  $Z3$  из высокостабильной СВЧ - керамики и согласующая микроплата на керамике ТЛ/0. Длина резонаторов составляет примерно четверть длины волны. Для снижения влияния нагрузки на электрические параметры к внешним выводам ППФ подключены резистивные ослабители  $R1$ ,  $R2$  типа ПР1-1 с ослаблением сигнала 4 дБ в каждом. В качестве конденсаторов  $C1$ ,  $C3$ ,  $C5$ ,  $C7$  использованы зазоры между